



⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift
⑯ DE 199 05 737 A 1

⑯ Int. Cl.⁷:
H 01 L 21/302
B 24 B 37/04

DE 199 05 737 A 1

⑯ Aktenzeichen: 199 05 737.0
⑯ Anmeldetag: 11. 2. 1999
⑯ Offenlegungstag: 31. 8. 2000

⑯ Anmelder:

Wacker Siltronic Gesellschaft für
Halbleitermaterialien AG, 84489 Burghausen, DE

⑯ Erfinder:

Altmann, Thomas, Dipl.-Chem., 84489 Burghausen,
DE; Wenski, Guido, Dipl.-Ing. (FH) Dr., 84489
Burghausen, DE; Bernwinkler, Willi, 84364 Bad
Birnbach, DE; Feuchtinger, Ernst, Dipl.-Ing. (FH),
84384 Wittibreut, DE; Heier, Gerhard, 84561
Mehring, DE; Winkler, Wolfgang, 84529 Tittmoning,
DE

⑯ Entgegenhaltungen:

EP 08 87 152 A2

The National Technology Readmap for Semiconductors: Technology Needs, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose, 1997, pp. 64-66;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Halbleiterscheibe mit verbesserter Ebenheit und Verfahren zur Herstellung der Halbleiterscheibe

⑯ Gegenstand der Erfindung ist eine Halbleiterscheibe mit einer Vorderseite und einer Rückseite, und Ebenheitswerten, bezogen auf Teilbereiche eines Flächenrasters auf der Vorderseite der Halbleiterscheibe, die gekennzeichnet ist durch einen maximalen lokalen Ebenheitswert SFQR_{max} von gleich oder kleiner 0,13 µm und SFQR-Einzelwerten, die sich in einem Randbereich der Halbleiterscheibe nicht signifikant unterscheiden von denen in einem Zentrumsbereich der Halbleiterscheibe. Gegenstand der Erfindung ist auch ein Verfahren zur Herstellung einer derartigen Halbleiterscheibe, das dadurch gekennzeichnet ist, daß die Eingangsdicke der Halbleiterscheibe um 20 bis 200 µm größer ist als die Läuferscheibendicke und die Halbleiterscheibe poliert wird, bis die Enddicke der Halbleiterscheibe um 2 bis 20 µm größer ist als die Läuferscheibe.

DE 199 05 737 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Halbleiterscheibe mit verbesserter Ebenheit im Randbereich und ein Verfahren zur Herstellung einer derartigen Halbleiterscheibe. Halbleiterscheiben mit einer hohen Ebenheit eignen sich für die Verwendung in der Halbleiterindustrie, insbesondere zur Fabrikation von elektronischen Bauelementen mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13 µm.

- Eine Halbleiterscheibe, die insbesondere zur Fabrikation von elektronischen Bauelementen mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13 µm geeignet sein soll, muß eine Vielzahl besonderer Eigenschaften aufweisen. Eine besonders wichtige Eigenschaft ist die lokale Ebenheit der Halbleiterscheibe. Die moderne Steppertechnologie verlangt optimale lokale Ebenheiten in allen Teilbereichen einer Seite der Halbleiterscheibe. Anstelle der in der Vergangenheit vielfach üblichen rückseitenbezogenen globalen (GBIR; früher als TTV bezeichnet) und lokalen Ebenheitsmaße (SBIR; früher als LTV bezeichnet) treten Ebenheitsmaße, die den Fokussierungsmöglichkeiten eines Steppers in allen Teilbereichen der Scheibenseite Rechnung tragen. Ein solches Ebenheitsmaß ist der SFQR (site front-surface referenced least squares/range = Bereich der positiven und negativen Abweichung von einer über Fehlerquadratminimierung definierten Vorderseite für eine Bauelementfläche definierter Dimension). Die Größe SFQR_{max} gibt den höchsten SFQR-Wert für alle Bauelementflächen auf einer Halbleiterscheibe an. Eine allgemein anerkannte Faustregel besagt, daß der SFQR_{max}-Wert einer Halbleiterscheibe gleich oder kleiner der auf dieser Scheibe möglichen Linienbreite von darauf herzustellenden Halbleiterbauelementen sein muß. Eine Überschreitung dieses Wertes führt zu Fokussierungsproblemen des Steppers und damit zum Verlust des betreffenden Bauelements.
- Die endgültige Ebenheit einer Halbleiterscheibe wird in der Regel durch einen Polierprozeß erzeugt. Zur Verbesserung der Ebenheitswerte einer Halbleiterscheibe wurden Apparate und Verfahren zum gleichzeitigen Polieren von Vorder- und Rückseite der Halbleiterscheibe bereitgestellt und weiterentwickelt. Diese sogenannte Doppelseiten-Politur ist beispielsweise in der US 3,691,694 beschrieben. Gemäß einer in der EP 208 315 B1 beschriebenen Ausführungsform der Doppelseitenpolitur werden Halbleiterscheiben in Läuferscheiben aus Metall oder Kunststoff, die über geeignete dimensionierte Aussparungen verfügen, zwischen zwei rotierenden, mit einem Poliertuch belegten Poliertellern in Gegenwart eines Poliersols auf einer durch die Maschinen- und Prozeßparameter vorbestimmten Bahn bewegt und dadurch poliert (in der englischsprachigen Literatur werden Läuferscheiben als "carrier" oder "templates" bezeichnet). Um die bei der Doppelseitenpolitur angewandten Anpreßkräfte bevorzugt auf die zu polierende Halbleiterscheibe und nicht auf die Läuferscheibe wirken zu lassen, ist die Enddicke von nach dem Stand der Technik doppelseitenpolierten Halbleiterscheiben deutlich dicker als die Dicke der eingesetzten Läuferscheiben. Von E. Mendel und J. R. Hause werden im IBM Technical Report TR22.2342, präsentiert auf dem Spring Meeting of the Electrochemical Society in Boston, Massachusetts am 10. 05. 1979, beispielweise 2 bis 3 mil Überstand (entspricht 51 bis 76 µm) empfohlen. Dieser Überstand kann entweder durch Festlegung der notwendigen Polerdauer anhand der in Vorversuchen für eine bestimmte Versuchsführung ermittelten Abtragsrate oder durch auf die Läuferscheibe angebrachte Abstandshalter, wie sie in US 5,422,316 vorgeschlagen sind, gewährleistet werden.

Die Integration der Doppelseiten-Politur in Prozeßketten zur Herstellung von Halbleiterscheiben ist bekannt. In der EP 754 785 A1 ist die Abfolge Sägen eines Halbleiterkristalls, gefolgt von Kantenverrunden, Doppelseitenpolieren und Endpolieren der gewonnenen Halbleiterscheiben beschrieben. In der EP 755 751 A1 wird vorgeschlagen, zwischen Kantenverrundung und Doppelseitenpolitur ein Doppelseiten-Schleifverfahren anzuwenden. Zu den bevorzugten Ausführungsformen, die in der US 5,756,399 beschrieben sind, zählt die Prozeßkette Sägen – Kantenverrunden – Schleifen – alkalisches Ätzen – Doppelseitenpolieren. In der deutschen Patentmeldung mit dem Aktenzeichen 198 33 257.2 ist die Prozeßkette Sägen – Kantenverrunden – Schleifen – Ätzen – Doppelseitenpolieren – Endpolieren beansprucht, wobei das Ätzen mit einem verbesserten sauren Ätzverfahren durchgeführt wird. Diesen Prozeßketten ist gemeinsam, daß sie nach der Doppelseitenpolitur zu einer Halbleiterscheibe führen, die im Randbereich höhere lokale Geometriewerte, ausgedrückt als SFQR, aufweisen, als im Zentrumsbereich der Halbleiterscheibe. Vorgehensweisen wie die in der EP 187 307 A1 vorgeschlagene, den Randabfall durch eine schüsselförmige Eingangsgeometrie zu kompensieren, führen zwar unter günstigen Bedingungen eventuell zu einer Verbesserung der rückseitenbezogenen Geometriewerte GBIR und SBIR, sind jedoch für die im Hinblick auf die Bauelementerherstellung relevanten SFQR-Werte von Nachteil.

Es war daher die Aufgabe gestellt, eine Halbleiterscheibe bereitzustellen, die insbesondere zur Fabrikation von elektronischen Bauelementen mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13 µm geeignet ist und die erwähnten Nachteile hinsichtlich der lokalen Geometrie im Randbereich, ausgedrückt als SFQR, nicht aufweist. Ferner sollten die weiteren Eigenschaften der Halbleiterscheibe mindestens genau so gut sein, wie die von nach dem Stand der Technik hergestellten Halbleiterscheiben, und es sollten Vorteile im Hinblick auf ihre Herstellkosten bestehen.

Gegenstand der Erfindung ist eine Halbleiterscheibe mit einer Vorderseite und einer Rückseite, und Ebenheitswerten, bezogen auf Teilbereiche eines Flächenrasters auf der Vorderseite der Halbleiterscheibe, die gekennzeichnet ist durch einen maximalen lokalen Ebenheitswert SFQR_{max} von gleich oder kleiner 0,13 µm und SFQR-Linzelwerten, die sich in einem Randbereich der Halbleiterscheibe nicht signifikant unterscheiden von denen in einem Zentrumsbereich der Halbleiterscheibe.

Vorzugsweise wird es dann als nicht signifikanter Unterschied zwischen SFQR-Einzelwerten im Randbereich und im Zentrumsbereich angesehen, wenn der arithmetische Mittelwert der SFQR-Werte für den Randbereich um maximal 0,03 µm vom arithmetischen Mittelwert der SFQR-Werte für den Zentrumsbereich differiert.

Gegenstand der Erfindung ist ferner ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe durch gleichzeitiges Polieren einer Vorderseite und einer Rückseite der Halbleiterscheibe zwischen sich drehenden Poliertellern unter Zuführen eines Poliersols, wobei die Halbleiterscheibe in einer Aussparung einer Läuferscheibe liegt und auf einer bestimmten geometrischen Bahn gehalten wird, und die Läuferscheibe eine bestimmte Läuferscheibendicke besitzt, und die Halbleiterscheibe vor dem Polieren eine Eingangsdicke und nach dem Polieren eine Enddicke aufweist, das dadurch gekennzeichnet ist, daß die Eingangsdicke der Halbleiterscheibe um 20 bis 200 µm größer ist, als die Läuferscheibendicke und die Halbleiterscheibe poliert wird, bis die Enddicke der Halbleiterscheibe um 2 bis 20 µm größer ist, als die Läuferscheiben-

dicke.

Wesentliches Merkmal der Erfindung ist es, daß die Halbleiterscheibe solange einer Doppelseitenpolitur unterzogen werden muß, bis die Dicke der fertig polierten Halbleiterscheibe nur wenig höher ist als die Dicke der eingesetzten Läuferscheibe, wobei die Dickendifferenz in einem engen Fenster von 2 bis 20 µm liegen muß. Wie die später folgenden Beispiele verdeutlichen werden, war das Auffinden des Fensters überraschend und nicht vorhersehbar.

5

Ausgangsprodukt des Verfahrens ist eine Halbleiterscheibe, die auf bekannte Weise von einem Kristall abgetrennt wurde, beispielsweise von einem abgelängten und rundgeschliffenen Einkristall aus Silicium, und deren Vorder- und/oder Rückseite mittels eines Oberflächenschleifschrittes bearbeitet wurde. Falls dies gewünscht wird, kann der Kristall mit einem oder mehreren Orientierungsmerkmalen zur Identifizierung der Kristallachsen versehen werden, beispielweise einem Notch und/oder einem Flat. Ebenso kann die Kante der Halbleiterscheibe an einer geeigneten Stelle in der Prozeßkette mittels einer geeignet profilierten Schleifscheibe verrundet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, daß die Oberfläche der Halbleiterscheiben nach dem Schleifschritt geätzt wird.

10

Endprodukt des Verfahrens ist eine doppelseitenpolierte Halbleiterscheibe, die den Anforderungen an Halbleiterscheiben als Ausgangsmaterial für Halbleiterbauelemente-Prozesse mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13 µm genügt und aufgrund reduzierter Materialabträge den nach dem Stand der Technik hergestellten Halbleiterscheiben bezüglich ihrer Herstellkosten überlegen ist.

15

Das erfundengemäße Verfahren kann prinzipiell zur Herstellung eines scheibenförmigen Körpers eingesetzt werden, der aus einem Material besteht, welches mit dem eingesetzten chemisch-mechanischen Doppelseiten-Polierverfahren bearbeitet werden kann. Derartige Materialien, deren Weiterverarbeitung vorwiegend in der Halbleiterindustrie stattfindet, jedoch nicht auf diese beschränkt ist, sind zum Beispiel Silicium, Silicium/Germanium, Siliciumdioxid, Siliciumnitrid, Galliumarsenid und weitere sogenannte III-V-Halbleiter. Silicium in einkristalliner Form, beispielsweise kristallisiert durch einen Czochralski- oder einen Zonenziehprozeß, ist bevorzugt. Silicium mit einer Kristallorientierung (100), (110) oder (111) ist besonders bevorzugt.

20

Das Verfahren eignet sich besonders zur Herstellung von Siliciumscheiben mit Durchmessern von insbesondere 200 mm, 300 mm, 400 mm und 450 mm und Dicken von wenigen 100 µm bis einigen cm, bevorzugt von 400 µm bis 1200 µm. Die Halbleiterscheiben können entweder direkt als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Halbleiterbauelementen eingesetzt werden oder nach Durchführung eines Endpolierschrittes nach dem Stand der Technik und/oder nach Aufbringen von Schichten wie Rückseitenversiegelungen oder einer epitaktischen Beschichtung der Scheibenvorderseite mit Silicium oder geeigneten weiteren Halbleitermaterialien und/oder nach Konditionierung durch eine Wärmebehandlung beispielsweise unter Wasserstoff- oder Argonatmosphäre ihrem Bestimmungszweck zugeführt werden. Neben der Herstellung von Scheiben aus einem homogenen Material kann die Erfindung natürlich auch zur Herstellung von mehrschichtig aufgebauten Halbleitersubstraten wie SOI-Scheiben (silicon-on-insulator) und sogenannten bonded wafers eingesetzt werden.

25

Die weitere Beschreibung des Verfahrens erfolgt am Beispiel der Herstellung einer Siliciumscheibe.

30

Prinzipiell ist es möglich, eine beispielsweise durch ein Innenloch- oder Drahtsägeverfahren gesägte Siliciumscheibe, die je nach Durchmesser und Art des Sägeprozesses ein Damage bis in eine Tiefe im Bereich von 10 bis 40 µm aufweist, direkt dem erfundengemäßen Doppelseitenpolierschritt zu unterziehen. Es ist jedoch sinnvoll und daher bevorzugt, die scharf begrenzte und daher mechanisch sehr empfindliche Scheibenkante mit Hilfe einer geeignet profilierten Schleifscheibe zu verrunden. Weiterhin ist es zwecks Verbesserung der Geometrie und teilweisem Abtrag der zerstörten Kristallschichten möglich, die Siliciumscheibe einem mechanischen Abtragsschritt wie Läppen oder Schleifen zu unterziehen, um den Materialabtrag im erfundengemäßen Polierschritt zu reduzieren. Bevorzugt ist, die Siliciumscheibe einem Oberflächen-Schleifschritt zu unterziehen, wobei entweder eine Seite geschliffen wird oder beide Seiten sequentiell oder beide Seiten gleichzeitig geschliffen werden. Sequentielles Oberflächenschleifen der Scheibenvorder- und -rückseite ist besonders bevorzugt. Zum Entfernen des in den mechanischen Prozeßschritten zwangsläufig erzeugten Damage der Scheibenoberfläche und -kante und zum Entfernen von gegebenenfalls vorhandenen Verunreinigungen, beispielsweise im Damage gebundenen metallischen Verunreinigungen, kann an dieser Stelle ein Ätzschritt folgen. Dieser Ätzschritt kann entweder als naßchemische Behandlung der Siliciumscheibe in einer alkalischen oder sauren Ätzmischung oder als Plasmabehandlung ausgeführt werden. Ein saurer Ätzschritt in einer Mischung aus konzentrierter wäßriger Salpetersäure und konzentrierter wäßriger Flußsäure gemäß der in der deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 198 33 257.2 beanspruchten Ausführungsform ist bevorzugt.

35

Ein besonders bevorzugtes Ausgangsmaterial für das erfundengemäße Polierverfahren sind Halbleiterscheiben aus Silicium mit einem Durchmesser von gleich oder größer 200 mm, hergestellt durch Sägen eines Silicium-Einkristalls, gefolgt von Kantenverrundung, sequentiellem Oberflächenschleifen beider Scheibenseiten unter Abtrag von 10 µm bis 100 µm Silicium pro Seite und naßchemischem Ätzen in einer sauren Ätzmischung unter Abtrag von 5 µm bis 50 µm Silicium pro Scheibenseite.

40

Zur Durchführung des erfundengemäßen Polierschrittes kann eine handelsübliche Doppelseitenpoliermaschine geeigneter Größe verwendet werden, wie sie beispielsweise im IBM Technical Report TR22.2342 beschrieben ist. Die Poliermaschine besteht im wesentlichen aus einem frei horizontal drehbaren unteren Polierteller und einem frei horizontal drehbaren oberen Polierteller, die beide mit jeweils einem Poliertuch bedeckt sind, und erlaubt unter kontinuierlicher Zuführung eines Poliersols geeigneter chemischer Zusammensetzung das beidseitige abtragende Polieren von Halbleiterscheiben, in diesem Falle von Siliciumscheiben.

45

Es ist möglich, nur eine Siliciumscheibe zu polieren. In der Regel wird jedoch aus Kostengründen eine Vielzahl von Siliciumscheiben gleichzeitig poliert, wobei die Anzahl von den baulichen Gegebenheiten der Poliermaschine abhängt. Die Siliciumscheiben werden dabei durch Läuferscheiben, die über ausreichend dimensionierte Aussparungen zur Aufnahme der Siliciumscheiben verfügen, während des Polierens auf einer durch Maschinen- und Prozeßparameter bestimmten geometrischen Bahn gehalten. Die Läuferscheiben sind beispielsweise mit einer Triebstock-Stiftverzahnung oder einer Evolventenverzahnung mit der Poliermaschine über einen sich drehenden innen und einen sich in der Regel gegenläufig drehenden äußeren Stift- oder Zahnkranz in Kontakt und werden dadurch in eine rotierende Bewegung zwi-

50

55

60

65

schen den beiden Poliertellern versetzt.

Einflußparameter für die Bahn der Siliciumscheiben in Relation zum oberen und unteren Polierteller während des Polivorganges sind beispielsweise die Abmessungen der Polierteller, die Konstruktion der Läuferscheiben sowie die Drehzahlen vom oberen Polierteller, unteren Polierteller und Läuferscheibe. Befindet sich jeweils eine Siliciumscheibe im Zentrum einer Läuferscheibe, bewegt sich die Siliciumscheibe kreisförmig um das Zentrum der Poliermaschine. Sind mehrere Siliciumscheiben anzentrisch in einer Läuferscheibe positioniert, ergibt sich durch Drehung der Läuferscheiben um ihre eigene Achse eine Hypozykloidenbahn. Für den erfundungsgemäßen Polierprozeß ist eine Hypozykloidenbahn bevorzugt. Besonders bevorzugt ist der gleichzeitige Einsatz von vier bis sechs Läuferscheiben, die mit jeweils mindestens drei in gleichen Abständen auf einer kreisförmigen Bahn angeordneten Siliciumscheiben belegt sind.

Prinzipiell können die beim erfundungsgemäßen Verfahren eingesetzten Läuferscheiben aus jedem Material gefertigt werden, das gegenüber den durch den Antrieb verursachten mechanischen Beanspruchungen, vor allem den Druck- und Zugbelastungen, ausreichende mechanische Stabilität ausweist. Außerdem darf das Material von dem verwendeten Poliersol und den Poliertüchern chemisch und mechanisch nicht nennenswert angegriffen werden, um eine ausreichend hohe Lebensdauer der Läuferscheiben zu gewährleisten und eine Kontamination der polierten Siliciumscheiben zu vermeiden. Darüber hinaus muß das Material zur Herstellung sehr ebener, spannungs- und wellenfreier Läuferscheiben in der gewünschten Dicke und Geometrie geeignet sein. Grundsätzlich können die Läuferscheiben beispielsweise aus Metall, Kunststoff, faserverstärktem Kunststoff oder kunststoffbeschichtetem Metall gefertigt sein. Läuferscheiben aus Stahl oder aus faserverstärktem Kunststoff sind bevorzugt; Läuferscheiben aus rostfreiem Chromstahl sind besonders bevorzugt.

Die Läuferscheiben besitzen eine oder mehrere Aussparungen bevorzugt in Kreisform zur Aufnahme von einer oder mehreren Siliciumscheiben. Um eine freie Beweglichkeit der Siliciumscheibe in der rotierenden Läuferscheibe zu gewährleisten, muß die Aussparung geringfügig größer im Durchmesser sein als die zu polierenden Siliciumscheiben. Ein um 0,1 mm bis 2 mm größerer Durchmesser ist bevorzugt; ein um 0,3 bis 1,3 mm größerer Durchmesser ist besonders bevorzugt. Um während des Polierens eine Beschädigung der Scheibenkante durch die Innenkante der Aussparung in der Läuferscheibe zu verhindern, ist es sinnvoll und daher bevorzugt, die Innenseite der Aussparungen mit einer Kunststoffbeschichtung von gleicher Dicke wie die Läuferscheibe auszukleiden, wie in der EP 208 315 B1 vorgeschlagen wird. Geeignete Kunststoffe sind dabei beispielsweise Polyamid, Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polytetrafluorethylen oder Polyvinylidendifluorid, die alle gleichermaßen bevorzugt sind. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, gemäß der in der EP 776 030 A2 beschriebenen Vorgehensweise die Innenseite der Aussparungen mit einer Vorrichtung zu versehen, die während der Doppelseitenpolitur eine gleichzeitige Politur der Kante der Siliciumscheibe ermöglicht.

Die Läuferscheiben für das erfundungsgemäße Polierverfahren besitzen eine bevorzugte Dicke von 400 bis 1200 µm, die sich nach der Enddicke der polierten Siliciumscheiben richtet, welche letztlich vom Durchmesser der Siliciumscheiben und vom geplanten Anwendungszweck abhängt. Charakteristisch für die Erfindung ist, daß die Eingangsdicke der zu polierenden Siliciumscheiben bevorzugt um 20 bis 200 µm größer ist als die Läuferscheibendicke, wobei der Bereich von 30 bis 70 µm besonders bevorzugt ist, und die Enddicke der polierten Scheiben bevorzugt um 2 bis 20 µm größer ist als die Läuferscheibendicke, wobei der Bereich von 5 bis 15 µm besonders bevorzugt ist. Jedoch sind auch geringe Abweichungen von den angegebenen Dickenbereichen möglich, ohne daß eine gravierende Erhöhung der lokalen Ebenheitswerte SFQR im Randbereich der Scheiben beobachtet wird. Der Siliciumabtrag durch den Polierschritt beträgt 5 bis 100 µm, bevorzugt 10 µm bis 60 µm, und besonders bevorzugt 20 bis 50 µm.

Im Rahmen der hinsichtlich der Dickenverhältnisse gemachten Ausführungen wird der Doppelseiten-Polierschritt bevorzugt in der dem Fachmann bekannten Art und Weise durchgeführt. Poliertücher sind am Markt in einer großen Bandbreite von Eigenschaften erhältlich. Bevorzugt wird mit einem handelsüblichen Polyurethan-Poliertuch einer Härte von 40 bis 120 (Shore A) poliert. Besonders bevorzugt sind Polyurethantücher mit eingearbeiteten Polyethylenfasern in einem Härtebereich von 60 bis 90 (Shore A). Im Falle der Politur von Siliciumscheiben empfiehlt sich die kontinuierliche Zuführung eines Poliersols mit einem pH-Wert von bevorzugt 9 bis 12, besonders bevorzugt 10 bis 11, aus bevorzugt 1 bis 10 Gew.-%, besonders bevorzugt 1 bis 5 Gew.-% SiO₂ in Wasser, wobei der Polierdruck bevorzugt 0,05 bis 0,5 bar, besonders bevorzugt 0,1 bis 0,3 bar beträgt. Die Silicium-Abtragsrate liegt bevorzugt bei 0,1 bis 1,5 µm/min und besonders bevorzugt bei 0,4 bis 0,9 µm/min.

Die Siliciumscheiben werden nach Beendigung der Politur gegebenenfalls von anhaftendem Poliersol gereinigt und getrocknet und können anschließend auf einem handelsüblichen, beispielsweise kapazitiv oder optisch arbeitenden Geometriemeßgerät hinsichtlich ihrer lokalen Geometrie SFQR vermessen werden.

Abhängig von ihrer weiteren Bestimmung kann es notwendig sein, die Scheibenvorderseite einer Endpolitur nach dem Stand der Technik zu unterziehen, beispielsweise mit einem weichen Poliertuch unter Zuhilfenahme eines alkalischen Poliersols auf SiO₂-Basis. Zum Erhalt der im erfundungsgemäßen Polierschritt erzeugten sehr niedrigen und gleichmäßig verteilten lokalen Geometriewerte sollte der Siliciumabtrag von der Scheibe dabei relativ niedrig sein und beispielsweise bei 0,1 bis 0,7 µm liegen.

Falls notwendig, kann an einer beliebigen Stelle der Prozeßkette eine Wärmebehandlung der Halbleiterscheibe eingefügt werden, beispielsweise um thermische Donatoren zu vernichten oder um eine Störung von oberflächennahen Kristallschichten auszuheilen. Weiterhin können eine Laserbeschriftung zur Scheibenidentifizierung und/oder ein Kantenpolierschritt an geeigneter Stelle der Prozeßkette eingefügt werden, zum Beispiel vor oder nach dem Schleifen im Falle der Lasermarkierung sowie vor, im oder nach der Doppelseitenpolitur im Falle des Kantenpolierens. Eine Reihe weiterer, für bestimmte Produkte erforderliche Prozeßschritte wie beispielsweise die Aufbringung von Rückseitenbeschichtungen aus Polysilicium, Siliciumdioxid oder Siliciumnitrid oder die Aufbringung einer Epitaxieschicht aus Silicium oder weiteren halbleitenden Materialien auf die Vorderseite der Siliciumscheibe läßt sich ebenfalls nach dem Fachmann bekannten Verfahren an den geeigneten Stellen in die Prozeßkette einbauen. Es kann darüber hinaus auch zweckmäßig sein, die Halbleiterscheibe vor oder nach einzelnen Prozeßschritten einer Batch- oder Einzelscheibenreinigung nach dem Stand der Technik zu unterziehen.

Hinsichtlich der weiteren üblicherweise zur Scheibencharakterisierung herangezogenen, dem Fachmann wohlbekann-

ten Parameter wie beispielsweise Oberflächenfehler, Rauigkeit und Metallkontamination der Scheibenoberfläche, und Magic-Mirror-Defekte weist eine erfundungsgemäß hergestellte Halbleiterscheibe keine Nachteile gegenüber einer Halbleiterscheibe auf, die nach dem Stand der Technik hergestellt wird.

Eine erfundungsgemäß hergestellte Halbleiterscheibe, insbesondere eine Siliciumscheibe erfüllt die Anforderungen für die Herstellung von Halbleiterbauelementen mit Linienbreiten gleich oder kleiner $0,13 \mu\text{m}$. Das erfundungsgemäß Verfahren hat sich als optimale Lösung zur Herstellung von Siliciumscheiben mit den geschilderten Merkmalen erwiesen. Überraschend und nicht zu erwarten ist, daß nur ein relativ enges Fenster für den Überstand der Dicke der fertig polierten Scheibe über die Läuferscheibendicke zur Eliminierung des für nach dem Stand der Technik doppelseitenpolierte Halbleiterscheiben charakteristischen Randabfalls mit den damit verbundenen erhöhten SFQR-Werten führt. An das Ausgangsprodukt werden minimale Geometrieanforderungen gestellt, was die Anforderungen an die Vorprozesse reduziert. Die im erfundungsgemäß Schritt erzielte gute Geometrie tritt schon nach relativ geringen Materialabträgen und durch die erhöhte Prozeßsicherheit, gepaart mit einem verringerten Bruchrisiko, in sehr hohen Ausbeuten auf, ohne daß kostenintensive Schritte zur lokalen Geometriekorrektur beispielsweise durch Plasmaätzungen notwendig sind. Deshalb ist das vorgeschlagene Verfahren auch wirtschaftlich konkurrenzfähig und kann sogar zur Nacharbeit von Ausfallscheiben und zur Bearbeitung von Reclaimscheiben herangezogen werden.

Zu den nachfolgend beschriebenen Beispielen und Vergleichsbeispielen gehören Figuren, die die Erfindung verdeutlichen.

Fig. 1 zeigt die Verteilung der lokalen Ebenheitswerte SFQR für flächendeckend angeordnete Teilbereiche (52 Flächenelemente) der Größe $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ einer gemäß Beispiel B1f hergestellten doppelseitenpolierten Siliciumscheibe mit einem Durchmesser von 200 mm.

Fig. 2 zeigt die Verteilung der lokalen Ebenheitswerte SFQR für flächendeckend angeordnete Teilbereiche (52 Flächenelemente) der Größe $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ einer gemäß Vergleichsbeispiel 2c hergestellten doppelseitenpolierten Siliciumscheibe mit einem Durchmesser von 200 mm.

Fig. 3 zeigt die Verteilung der lokalen Ebenheitswerte SFQR für flächendeckend angeordnete Teilbereiche (112 Flächenelemente) der Größe $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ einer gemäß Beispiel 2 hergestellten doppelseitenpolierten Siliciumscheibe mit einem Durchmesser von 300 mm.

Fig. 4 zeigt die Verteilung der lokalen Ebenheitswerte SFQR für flächendeckend angeordnete Teilbereiche (112 Flächenelemente) der Größe $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ einer gemäß Vergleichsbeispiel 3 hergestellten doppelseitenpolierten Siliciumscheibe mit einem Durchmesser von 300 mm.

Alle im folgenden aufgeführten Beispiele und Vergleichsbeispiele betreffen die Herstellung von Siliciumscheiben mit einem Durchmesser von entweder $(200 \pm 0,1) \text{ mm}$ oder $(300 \pm 0,2) \text{ mm}$, einem Sauerstoffgehalt von $(6 \pm 1) \cdot 10^{17} \text{ Atome}/\text{cm}^3$ und einer Bor-Dotierung, die zu einem Widerstand im Bereich von 10 bis $20 \Omega \cdot \text{cm}$ führt. Die dazu benötigten Einkristalle wurden nach dem Stand der Technik gezogen, abgelängt, rundgeschliffen und auf einer handelsüblichen Drahtsäge in Scheiben mit einer auf das Endprodukt zugeschnittenen Dicke zersägt. Nach dem Runden der Kanten folgte auf einer Rotationsschleifmaschine ein Oberflächen-Schleifschritt mit Diamanten der Körnung 600 Mesh, wobei nacheinander von der Scheibenvorder- und -rückseite je $30 \mu\text{m}$ Silicium abgetragen wurden. Daran schloß sich ein saurer Ätzschritt nach dem Strömungsätzverfahren an, wobei durch Hintauchen der sich drehenden Scheiben in eine Mischung aus 90 Gew.-% konzentrierter Salpetersäure (70 Gew.-% in wässriger Lösung), 10 Gew.-% konzentrierter Flußsäure (50 Gew.-% in wässriger Lösung) und 0,1 Gew.-% Ammoniumlaurylsulfat pro Scheibenseite gleichzeitig je $10 \mu\text{m}$ Silicium abgetragen wurde. Die Ätzmischung war auf $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ temperiert und wurde mit Stickstoffgas durchströmt. Nach den aufgeführten Prozeßschritten sowie nach dem in den nachfolgenden Beispielen und Vergleichsbeispielen beschriebenen Polierschritt wurden Reinigungs- und Trocknungsschritte nach dem Stand der Technik durchgeführt.

Beispiel 1 (B1d–B1k)

Vergleichsbeispiel 1 (V1a–V1c und V11)

Es standen zwei Gruppen von 200-mm-Siliciumscheiben mit geätzter Oberfläche und Dicken von $770 \mu\text{m}$ und $780 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Außerdem standen fünf Läuferscheiben aus rostfreiem Chromstahl mit geläpptter Oberfläche und einer Dicke von $720 \mu\text{m}$ zur Verfügung, die über jeweils sechs kreisförmige, in gleichen Abständen auf einer Kreisbahn angeordnete, mit Polyamid ausgekleidete Aussparungen vom Innendurchmesser 200,5 mm verfügten und die gleichzeitige Politur von 30 200-mm-Siliciumscheiben auf einer handelsüblichen Doppelseitenpoliermaschine ermöglichten.

Der Doppelseitenpolierschritt wurde mit einem handelsüblichen, mit Polyethylenfasern verstärkten Polyurethan-Poliertuch der Härte 74 (Shore A), welches jeweils auf dem oberen und dem unteren Polierteller aufgeklebt war, unter Verwendung eines Poliersols mit einem SiO_2 -Feststoffgehalt von 4 Gew.-% und einem pH-Wert von 11 unter einem Anpreßdruck von 0,15 bar durchgeführt. Die Politur erfolgte bei einer Temperatur des oberen und des unteren Poliertellers von jeweils 40°C und führte zu einer Abtragsrate von $0,55 \mu\text{m}/\text{min}$. Es wurden insgesamt sieben Polierfahrten mit den Siliciumscheiben der Dicke $770 \mu\text{m}$ und fünf Polierfahrten mit den Siliciumscheiben der Dicke $780 \mu\text{m}$ unter Realisierung verschiedener Polierabträge durchgeführt. Die Siliciumscheiben werden nach Beendigung der Politur von anhaftendem Poliersol gereinigt, getrocknet und auf einem handelsüblichen, nach dem kapazitiven Prinzip arbeitenden Geometriemeßgerät mit 3 mm Randausschluß hinsichtlich ihrer lokalen Geometrie SFQR (Raster $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) gemessen. Die nachfolgende Tabelle gibt neben dem Polierabtrag den Dickenunterschied zwischen fertig polierter Siliciumscheibe und Läuferscheibe ("Überstand") und den Mittelwert der höchsten SFQR-Werte für jede der 30 Siliciumscheiben der jeweiligen Polierfahrt ("SFQR_{max}") an. Die SFQR-Werte für den Randbereich der polierten Siliciumscheiben aus den Beispielen B1d bis B1k liegen nicht signifikant höher als für den Zentrumsbereich, wie für eine Siliciumscheibe aus Beispiel B1f in **Fig. 1** verdeutlicht ist. Im Gegensatz dazu liegen die höchsten SFQR-Werte für die polierten Siliciumscheiben aus den Vergleichsbeispielen V1a bis V1c sowie V11 im Randbereich.

DE 199 05 737 A 1

Daten zu den 200-mm-Siliciumscheiben aus Beispiel 1/Vergleichsbeispiel 1

	Bspl. 1/	Läufer-	Eingangs-	Polierab-	Überstand	SFQRmax
	Vgl. 1	scheiben-	dicke (μm)	trag (μm)	(μm)	(μm)
		dicke (μm)	Si-Scheibe			
10	V 1a	720	770	50	0	0,19±0,03
	V 1b	720	770	49	1,0	0,16±0,05
	V 1c	720	770	48	1,5	0,18±0,03
15	B 1d	720	770	47	3	0,09±0,01
	B 1e	720	770	45	5	0,09±0,01
	B 1f	720	770	42	8	0,08±0,01
20	B 1g	720	770	40	10	0,08±0,02
	B 1h	720	780	48	12	0,08±0,01
	B 1i	720	780	45	15	0,09±0,02
25	B 1j	720	780	42	18	0,10±0,02
	B 1k	720	780	40	20	0,12±0,03
	V 1l	720	780	35	25	0,15±0,04

30

Vergleichsbeispiel 2

Es wurden 200-mm-Siliciumscheiben poliert wie in Beispiel 1 beschrieben mit dem Unterschied, daß analog aufgebaute Läuferscheiben mit einer Dicke von 600 μm eingesetzt wurden, die Siliciumscheiben eine in vier Gruppen abgestufte Eingangsdicke zwischen 680 μm und 800 μm besaßen und jeweils 40 μm Silicium durch die Politur entfernt wurden. Die relevanten Daten für vier Polierfahrten mit jeweils 30 Siliciumscheiben sind in nachfolgender Tabelle enthalten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus den Vergleichsbeispielen 2a bis 2d liegen signifikant höher als für den Zentrumsbereich, wie für eine Siliciumscheibe aus Vergleichsbeispiel 2c in Fig. 2 verdeutlicht ist.

40

Daten zu den 200-mm-Siliciumscheiben aus Vergleichsbeispiel 2

	Vgl. 2	Läufer-	Eingangs-	Polierab-	Überstand	SFQRmax
		scheiben-	dicke (μm)	trag (μm)	(μm)	(μm)
		dicke (μm)	Si-Scheibe			
50	Vgl. 2a	600	680	40	40	0,17±0,05
	Vgl. 2b	600	730	40	90	0,15±0,03
	Vgl. 2c	600	770	40	130	0,16±0,04
	Vgl. 2d	600	800	40	160	0,19±0,05

55

Beispiel 2

Es wurde vorgegangen wie in Beispiel 1 beschrieben mit folgenden Unterschieden: Es standen 300-mm-Siliciumscheiben mit geätzter Oberfläche und einer Dicke von 820 μm zur Verfügung. Außerdem standen fünf Läuferscheiben aus rostfreiem Chromstahl mit geläppter Oberfläche und einer Dicke von 770 μm zur Verfügung, die über jeweils drei kreisförmige, in gleichen Abständen auf einer Kreisbahn angeordnete, mit Polyamid ausgekleidete Aussparungen vom Innendurchmesser 301 mm verfügten und die gleichzeitige Politur von 15 300-mm-Siliciumscheiben ermöglichten. In Analogie zu dem in Beispiel 1 angegebenen Verfahren wurden die Siliciumscheiben mit einem Abtrag von 40 μm Silicium bei einer Abtragsrate von 0,55 $\mu\text{m}/\text{min}$ poliert, gereinigt, getrocknet und hinsichtlich ihrer Geometrie auf einem handelsüblichen, kapazitiv arbeitenden Meßgerät unter Vorgabe von 3 mm Randausschluß und einem Raster von 25 mm × 25 mm charakterisiert. Angaben zu Überstand und lokaler Ebenheit finden sich in der Tabelle weiter unten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus Beispiel 2 liegen nicht signifikant höher als für den Zentrumsbe-

reich, wie in Fig. 3 verdeutlicht ist.

Beispiel 3

Es wurde vorgegangen wie in Beispiel 2 beschrieben mit den beiden Ausnahmen, daß ein entsprechend aufgebautes Poliertuch der Härte 82 (Shore A) verwendet wird und bei einer Abtragsrate von $0,82 \mu\text{m}/\text{min}$ $42 \mu\text{m}$ Silicium durch die Politur entfernt wurden. Die relevanten Daten sind ebenfalls in der Tabelle weiter unten enthalten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus Beispiel 3 liegen nicht signifikant höher als für den Zentrumsbereich.

Vergleichsbeispiel 3

Es wurde vorgegangen wie in Beispiel 2 beschrieben mit der Ausnahme, daß die Eingangsdicke der 300-mm-Siliciumscheiben $835 \mu\text{m}$ betrug. Die relevanten Daten sind ebenfalls in der Tabelle weiter unten enthalten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus Vergleichsbeispiel 3 liegen signifikant höher als für den Zentrumsbereich,

Vergleichsbeispiel 4

Es wurde vorgegangen wie in Vergleichsbeispiel 3 beschrieben mit der Ausnahme, daß die Läuferscheibdicke $700 \mu\text{m}$ betrug. Die relevanten Daten sind ebenfalls in der Tabelle weiter unten enthalten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus Vergleichsbeispiel 4 liegen signifikant höher als für den Zentrumsbereich.

Beispiel 4

Die Siliciumscheiben aus Vergleichsbeispiel 3 wurden gemäß der in Beispiel 2 beschriebenen Vorgehensweise erneut poliert, wobei diesmal Läuferscheiben der Dicke $770 \mu\text{m}$ eingesetzt und $18 \mu\text{m}$ Silicium durch die Politur entfernt wurde. Die relevanten Daten sind ebenfalls in der Tabelle weiter unten enthalten. Die SFQR-Werte für den Randbereich der Siliciumscheiben aus Beispiel 4 liegen nicht mehr signifikant höher als für den Zentrumsbereich.

Daten zu den 300-mm-Siliciumscheiben aus den Beispielen 2 bis 4 und den Vergleichsbeispielen 3 und 4

Beispiel	Läufer- scheiben- dicke (μm)	Eingangs- dicke (μm)	Polierab- trag (μm)	Überstand (μm)	SFQRmax (μm)
	Si-Scheibe				
Bsp. 2	770	820	40	10	$0,08 \pm 0,01$
Bsp. 3	770	820	42	8	$0,07 \pm 0,01$
Vgl. 3	770	835	40	25	$0,15 \pm 0,03$
Vgl. 4	700	820	40	80	$0,16 \pm 0,05$
Bsp. 4	770	795	18	7	$0,09 \pm 0,02$

Weitere Charakterisierung der hergestellten Scheiben

Die Vorderseiten, Rückseiten und Kanten der nach den oben aufgeführten Beispielen und Vergleichsbeispielen hergestellten 200-mm- und 300-mm-Siliciumscheiben wurden mit den üblichen, dem Fachmann bekannten Methoden hinsichtlich Oberflächenfehler, Rauigkeit und Metallkontamination und in ihrer Gesamtheit hinsichtlich Magic-Mirror-Defekten, Minoritätsträger-Lebenszeiten und Metallkontamination charakterisiert. Es wurden keine statistisch relevanten Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchsgruppen beobachtet.

Patentansprüche

1. Halbleiterscheibe mit einer Vorderseite und einer Rückseite, und Ebenheitswerten, bezogen auf Teilbereiche eines Flächenrasters auf der Vorderseite der Halbleiterscheibe, die gekennzeichnet ist durch einen maximalen lokalen Ebenheitswert $SFQR_{\max}$ von gleich oder kleiner $0,13 \mu\text{m}$ und SFQR-Einzelwerten, die sich in einem Randbereich der Halbleiterscheibe nicht signifikant unterscheiden von denen in einem Zentrumsbereich der Halbleiterscheibe.
2. Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe durch gleichzeitiges Polieren einer Vorderseite und einer Rückseite der Halbleiterscheibe zwischen sich drehenden Poliertellern unter Zuführen eines Poliersols, wobei die Halbleiterscheibe in einer Aussparung einer Läuferscheibe liegt und auf einer bestimmten geometrischen Bahn gehalten wird, und die Läuferscheibe eine bestimmte Läuferscheibendicke besitzt, und die Halbleiterscheibe vor dem Polieren eine Eingangsdicke und nach dem Polieren eine Enddicke aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß die Eingangsdicke der Halbleiterscheibe um 20 bis $200 \mu\text{m}$ größer ist, als die Läuferscheibendicke und die Halbleiterscheibe poliert wird, bis die Enddicke der Halbleiterscheibe um 2 bis $20 \mu\text{m}$ größer ist, als die Läuferscheibendicke.

DE 199 05 737 A 1

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Eingangsdicke der Halbleiterscheibe um 30 bis 70 µm größer ist als die Läuferscheibendicke.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Enddicke der Halbleiterscheibe um 5 bis 15 µm größer ist, als die Läuferscheibendicke.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Polierteller mit einem Poliertuch bedeckt sind und während des Polierens der Halbleiterscheibe ein alkalisches Poliersol kontinuierlich zugeführt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Poliersol einen SiO₂-Feststoffgehalt von 1 bis 10 Gew.-% und einen pH-Wert von 9 bis 12 besitzt.
- 10 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß durch das Polieren eine Dickenreduktion der Halbleiterscheibe um 15 bis 65 µm bewirkt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Läuferscheibendicke 400 bis 1200 µm beträgt.
- 15 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Halbleiterscheibe durch Aufsägen eines Halbleiterkristalls erzeugt und vor der Politur einem Schleifschritt unterworfen wird, wobei eine oder beide Seiten der Halbleiterscheibe geschliffen werden und ein Materialabtrag von 10 bis 100 µm erzielt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß vor oder nach dem Schleifen der Halbleiterscheibe eine Kante der Halbleiterscheibe verrundet wird.
- 20 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Polieren der Halbleiterscheibe ein Ätzschritt durchgeführt wird, mit dem ein Materialabtrag von 5 bis 50 µm von jeder der beiden Scheibenseiten erzielt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Polieren der Halbleiterscheibe ein Endpolierschritt durchgeführt wird, bei dem unter Anwendung eines weichen Poliertuchs ein Materialabtrag von 0,2 bis 2 µm von der Scheibenvorderseite erzielt wird.
- 25 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Polieren der Halbleiterscheibe oder nach dem Endpolierschritt eine halbleitende epitaktische Beschichtung mit einer Dicke von 1 µm bis 10 µm auf die Scheibenvorderseite aufgebracht wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß zusammen mit der Halbleiterscheibe mindestens eine weitere Halbleiterscheibe auf die selbe Weise poliert wird, wobei die weitere Halbleiterscheibe in einer weiteren Aussparung der Läuferscheibe oder in einer Aussparung einer anderen Läuferscheibe liegt.
- 30 15. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 14 zur Herstellung von Scheiben aus einem Material, das ausgewählt ist aus einer Gruppe, die Silicium, Silicium/Germanium, Siliciumdioxid, Siliciumnitrid, Galliumarsenid und andere III-V-Halbleiter umfaßt.

35

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

	0,02	0,06	0,04	0,04				
0,05	0,05	0,05	0,02	0,05	0,03			
0,03	0,06	0,07	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	
0,04	0,05	0,02	0,06	0,06	0,02	0,01	0,03	
0,02	0,03	0,01	0,06	0,08	0,02	0,02	0,03	
0,02	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,05	
0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,07			
0,02	0,03	0,04	0,05					

Fig. 1

	0,11	0,13	0,14	0,11				
0,14	0,09	0,03	0,03	0,07	0,13			
0,15	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02	0,07	0,10	
0,13	0,04	0,03	0,06	0,09	0,03	0,04	0,13	
0,15	0,04	0,04	0,07	0,08	0,02	0,05	0,11	
0,12	0,08	0,02	0,04	0,02	0,03	0,08	0,11	
0,16	0,07	0,04	0,03	0,08	0,14			
0,11	0,15	0,15	0,12					

Fig. 2

				0,04	0,04	0,04	0,04					
				0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,05	
				0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,04
				0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
				0,04	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03	0,05
				0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04
				0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,05
				0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03
				0,05	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04
				0,04	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,06
				0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,05	
						0,03	0,03	0,03	0,08			

Fig. 3

				0,09	0,12	0,14	0,11						
			0,10	0,16	0,06	0,05	0,08	0,08	0,16	0,10			
	0,08	0,08	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,08	0,10			
	0,09	0,08	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,07	0,15			
0,09	0,08	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,07	0,09		
0,09	0,07	0,05	0,04	0,04	0,06	0,03	0,05	0,05	0,06	0,08	0,10		
0,13	0,06	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,07	0,10		
0,08	0,07	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,08	0,09		
0,13	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,15			
0,08	0,09	0,08	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,11	0,12			
0,07	0,13	0,09	0,08	0,05	0,08	0,13	0,12	0,10					
				0,08	0,11	0,12	0,10						

Fig. 4